УДК 621.313.333

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ НАСОСНОГО АГРЕГАТА

О.О. Муравлева, Е.В. Вехтер, Т.В. Жарикова

Томский политехнический университет
E-mail: mop@tpu.ru; moo@isc.tpu.edu.ru

Рассматривается методика расчета энергосбережения при применении частотно-регулируемого электропривода в насосных станциях и центральных тепловых пунктах коммунальной сферы. Оценивается влияние энергетических характеристик асинхронного двигателя на энергосбережение.

В течение последнего десятилетия в России стали уделять пристальное внимание проблеме энергосбережения. Главная задача всех участников процесса энергосбережения и энергопотребления состоит в комплексном использовании всех рычагов управления спросом на энергоресурсы и стимулирования энергоресурсосбережения – технических, экономических, нормативных, информационных. В России предпринимаются шаги для создания условий, позволяющих приступить к осуществлению масштабной политики энергосбережения во всех сферах жизни общества. Одной из первоочередных задач энергосбережения является обеспечение технической базы. Это требует создания новых энергосберегающих технологий, в том числе разработки и внедрения регулируемого электропривода в системах холодного и горячего водоснабжения и теплоснабжения коммунальных хозяйств. В этом случае регулируемый электропривод, помимо экономии электроэнергии в размерах до 50 %, может обеспечить также экономию воды до 20 % и тепла до 6...10 % [1].

Целью данной работы является оценка влияния энергетических характеристик асинхронного двигателя (АД) на энергосбережение насосного агрегата.

Для использования в насосных установках пригодны различные виды привода, но не существует единственного идеально подходящего для всех видов установок. Каждый из них обладает своими достоинствами и недостатками. Выбору привода для конкретной установки должно предшествовать изучение технологического режима работы объекта. На этой основе принимаются технические решения и дается технико- экономическое обоснование, подтверждающее возможность и целесообразность применения регулируемого электропривода в насосной установке.

Экономию электроэнергии ΔW при использовании частотно регулируемого электропривода в насосных установках систем водоснабжения определяем по формуле [2]:

$$\Delta W = \Delta P_{нас.агр} \cdot t, \quad (1)$$

где $\Delta P_{нас.агр}$ – мощность, сэкономленная насосным агрегатом при применении регулируемого электропривода, кВт; t – время, ч.

При этом, помимо снижения энергопотребления насоса в $\Delta P_{нас.агр}$ учтены потери в устройствах, регулирующих частоту вращения насоса (потери в преобразователях частоты, снижение КПД двигателя из-за несинусоидальности преобразованного тока).

Основные положения и допущения, применяемые в расчетах:

1. Для расчетов принят реальный суточный график водопотребления небольшого населенного пункта, однако конкретные значения расхода могут быть получены на основе натурных испытаний предполагаемого объекта.
2. Значения, характеризующие трубопровод, определены ориентировочно.
3. КПД преобразователя частоты в процессе регулирования частоты вращения остается неизменным.
4. При изменении частоты вращения насос работает на систему с динамическим и статическим напором.

Для оценки энергосбережения приведем пример расчета экономии электроэнергии для регулируемого электропривода насосной станции, в состав которого входит: насос КМ45/30, асинхронный двигатель АИР112М2 и преобразователь частоты. Современные преобразователи частоты легко интегрируются в существующие системы управления и, поэтому практически все могут применяться для частотного регулирования АД насосных агрегатов.

Исходные данные. Номинальные: $N_н$=5,5 кВт – мощность насоса, $P_{2н}$=7,5 кВт – мощность двигателя, $H_н$=31 м – напор насоса, $Q_н$=45 м^3/ч – расход насоса, $\eta_{насн}$=0,7 – КПД насоса, $\eta_{двн}$=0,87 – КПД двигателя, $\eta_{пч}$=0,98=const – КПД преобразователя частоты; $H_п$=15,6 м – статическая составляющая напора (разница геодезических отметок насосной установки и потребителя плюс свободный напор у потребителя); $H_ф$=39,2 м – фиктивный напор насоса при нулевой подаче; g=9,81 м/с^2=2,725·10^{-3} м/ч^2, ρ=1000 кг/м^3 – плотность жидкости. По каталогу находим рабочие характеристики насоса, зависимости $\eta_{нас}=f(Q)$, $H=f(Q)$ [3].

По имеющимся данным строим график совместной работы насоса и трубопровода (рис. 1).

Средний расход измеряется $Q_{ср}$, м^3/ч, по разности показаний в начале Q_1 и в конце Q_2 контрольных участков:

$$Q_{ср.} = Q_2 - Q_1. \quad (2)$$

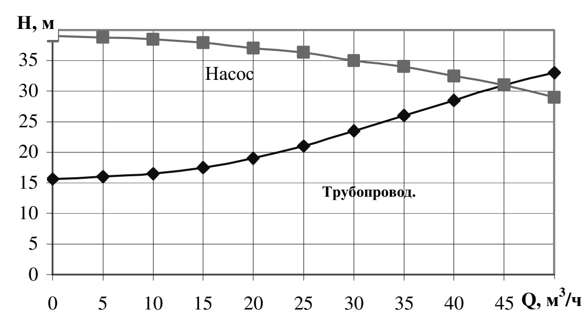


Рис. 1. График совместной работы насоса и трубопровода

Расчет проводим по суточному графику водопотребления, рис. 2 [2].

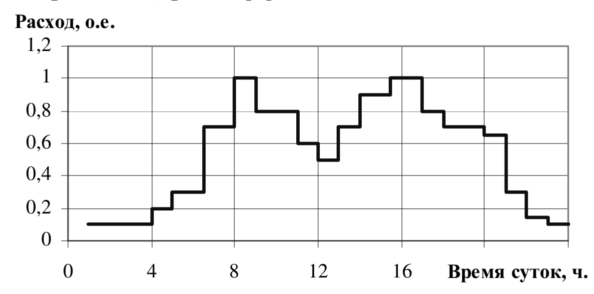


Рис. 2. Суточный график водопотребления

При частотном регулировании происходит изменение частоты вращения рабочего колеса насоса, что ведет к изменению всех его рабочих параметров. При этом изменяется положение характеристик насоса. Пересчет характеристик на другую частоту осуществляется с помощью формул приведения или уравнений подобия:

$$\frac{H_i}{H_н} = \left(\frac{n_i}{n_н}\right)^2; \frac{n_i}{n_н} = \frac{Q_i}{Q_н}; \frac{N_i}{N_н} = \left(\frac{n_i}{n_н}\right)^3, \quad (3)$$

где H_i, Q_i, N_i – напор и расход насоса, мощность в каждой i-ой точке соответственно; n_i, $n_н$ – переменное и номинальное значения частот вращения.

Формулы верны при работе одиночного насоса без статического напора. При работе с противодавлением этого делать нельзя, так как рабочие параметры насоса зависят также и от характеристики системы трубопроводов, в которой он работает. Рабочие параметры насосов должны определяться по результатам анализа реального режима работы насосной установки и сети трубопроводов с учетом крутизны их характеристик, определяемых соотношением $H_п/H_ф$.

Рассмотрим изменения основных рабочих параметров насоса в зависимости от его частоты вращения при работе на систему со статическим напором.

Напорная характеристика центробежного насоса, работающего с переменной частотой вращения, описывается уравнением [2]:

$$H=H_ф(n_i/n_н)^2-S_фQ^2, \quad (4)$$

где $H_ф$ и $S_ф$ – фиктивные параметры насоса (напор насоса и сечение трубопровода).

Из (4) видно, что гидравлические потери в насосе при одной и той же подаче не зависят от частоты вращения. Это значит, что при ее изменении напорные характеристики насоса остаются подобными друг другу и только изменяют свое положение по вертикали в координатах Q и H на графике совместной работы насоса и трубопровода. Таким образом, рабочие точки характеристики насоса при изменении его частоты вращения смещаются.

Совместным решением уравнений характеристик трубопровода и насоса (4) относительно параметра Q получаем зависимость изменения подачи насоса от его частоты вращения:

$$Q_i = Q_н\sqrt{\frac{(n_i/n_н)^2-(H_п/H_ф)}{1-(H_п/H_ф)}}. \quad (5)$$

Приведем эту зависимость к виду:

$$Q_i^* = \sqrt{\frac{(n_i/n_н)^{*2}-(H_п^*/H_ф^*)}{1-(H_п^*/H_ф^*)}}, \quad (6)$$

где $Q^*=Q/Q_н$, $H_п^*=H_п/H_н$, $H_ф^*=H_ф/H_н$ – относительные подача; статический напор; фиктивная высота подъема жидкости соответственно.

Значение частоты вращения в каждой рабочей точке при частотном регулировании характеристик насоса:

$$n_i = n_н\sqrt{Q^{*2}(1-H_п/H_ф)+(H_п/H_ф)}. \quad (7)$$

Работа насоса с частотой вращения, определяемой уравнением (7), обеспечивает работу при минимальных значениях напора на выходе насосной установки во всем диапазоне изменения ее подачи. В результате нивелирования напора энергопотребление насоса уменьшается до минимума.

Зависимость изменения напора, развиваемого насосом от его частоты вращения в каждой рабочей точке:

$$H_i=H_н(H_п^*+(1-H_п^*)Q^{*2}). \quad (8)$$

По уравнениям (6) и (7) для каждой рабочей точки, соответствующей данному расходу Q_i^*, определяется H_i и n_i. Затем по рабочим характеристикам насоса для каждого значения Q_i находим соответствующее значение $\eta_{насi}$.

В рекомендациях по проектированию насосных установок и при их экономической оценке недостаточно учитываются энергетические характеристики АД, который является основным преобразователем электрической энергии в механическую. В общем случае регулируемые машины работают по заданным законам изменения частоты вращения, частоты тока и напряжения. Особенности эксплуатации регулируемых машин обусловили появление целого ряда специальных требований, предъявляемых как к функциональным свойствам машин, так и к их массогабаритным и энергетическим показателям. Электрические машины общего назначения не могут соответствовать этим требованиям. Тем не менее, долгие годы в регулируемых системах из-за отсутствия специальных машин использовались, в основном, машины общего назначения, выполненные без учета специфики режимов работы. Это приводило к существенному увеличению установленной мощности, к снижению КПД и коэффициента мощности [4].

Короткозамкнутый АД является основным типом электрических машин для регулируемого электропривода, т.к. его главные преимущества – малая масса и габариты, простота конструкции, приемлемая стоимость и высокая надежность позволяют использовать его в широком диапазоне регулирования частоты вращения при обеспечении высокой равномерности движения для различных нагрузок [5].

Существующие методики проектирования электрических машин общего назначения применимы и для регулируемых электрических машин, но не позволяют в полной мере обеспечить адаптацию АД для энергосберегающих технологий. В отличие от машин общего назначения в процессе проектирования изменяются значения f, n и U, появляются новые ограничения, возрастает количество варьируемых величин.

Для разработки регулируемых АД на базе стандартной методики проектирования [6] необходимо задавать не номинальные значения величин – f, n, U, а приведенные расчетные значения, полностью характеризующие весь диапазон их изменения. Продолжительный режим работы такой машины характеризуется такими значениями n, f, U, при которых регулируемая электрическая машина допускает продолжительную работу при любом изменении этих величин в заданном диапазоне.

Диапазон регулирования частоты вращения обычно не превышает 1:2, более глубокое регулирование нецелесообразно, учитывая кубическую зависимость потребляемой мощности от частоты вращения. Нагрузка на валу двигателя носит вентиляторный характер, т.е. статический момент сопротивления на валу пропорционален квадрату скорости. При переменной частоте питания АД работают с различными законами регулирования, зависящими от характера нагрузки и типа системы. В электроприводах для регулирования или стабилизации скорости используют различные соотношения между частотой и напряжением. Выбор конкретного соотношения зависит от характера момента нагрузки.

Как уже было сказано выше, в результате снижения частоты происходит снижение максимального момента. Для регулирования скорости двигателя с постоянным моментом необходимо использовать полную I·R – компенсацию. Для этого вводим положительную обратную связь по току, которая ведет к дополнительному увеличению напряжения в обмотке статора. На малых скоростях это опасно с точки зрения недопустимого теплового режима работы. Однако при заданном диапазоне регулирования скорости тепловое состояние обмотки статора АД не является существенным и неопасно с точки зрения недопустимого нагрева.

Для насосных агрегатов возможно применение двух законов управления I – U/f=const и II – U/f^2=const [2, 4]. Оценка энергетических характеристик по этим законам, рассмотрена при проектировании регулируемого АД на базе общепромышленного АИР112М2 при частотах 50; 40; 30; 20 Гц без изменения геометрии поперечного сечения.

В табл. 1 представлены результаты электромагнитного расчета АД для обоих законов управления с учетом обратной связи по току.

Из табл. 1 видно, что с уменьшением частоты тока и частоты вращения АД существенно уменьшаются потери в стали и механические потери, потери в меди уменьшаются незначительно. Величина номинального скольжения и величина коэффициента мощности возрастает.

Графически результаты расчетов представлены на рис. 3–5 в виде зависимостей $\eta_{дв}=f(P_2)$ и $n=f(P_2)$. Анализ показывает, что при законе регулирования U/f^2=const (рис. 3) величина КПД выше, чем при законе U/f = const (рис. 4).

Для каждого найденного по формуле (7) n_i, в данной рабочей точке находим соответствующую мощность АД по графикам зависимости $n=f(P_2)$ (рис. 6) и соответствующий данной мощности КПД АД по графикам $\eta_{дв}=f(P_2)$ (рис. 3, 4) для обоих законов.

Полученные энергетические характеристики АД при регулировании частоты вращения используем для расчета электрической энергии, потребляемым насосным агрегатом. По значениям H_i, Q_i, $\eta_{нас i}$, $\eta_{дв i}$ находим мощность, потребляемую насосным агрегатом:

Таблица 1. *Результаты электромагнитного расчета АД*

Характеристики АД	Закон регулирования							
	I	II	I	II	I	II	I	II
f, Гц	50		40		30		20	
U, В	220	220	186	150,8	142	89,2	98	45,2
n, об/мин	3000	3000	2400	2400	1800	1800	1200	1200
$P_{ст.осн}$, Вт	172,1	172,1	129,5	90,9	85,3	37	48	11,3
$I_{1н}$, А	14,76	14,76	14,76	14,76	14,76	14,76	14,76	14,76
r_2*, о.е.	0,032	0,032	0,038	0,0467	0,0497	0,0784	0,072	0,156
$P_{э1}$, кВт	0,51	0,51	0,51	0,431	0,505	0,38	0,496	0,306
$P_{мех}$, кВт	111,93	111,93	76,66	76,66	43,12	43,12	19,16	19,16
P_1, кВт	9,039	9,039	7,578	6,086	5,706	3,443	3,828	1,539
P_2, кВт	7,86	7,86	6,504	5,115	4,745	2,7	2,969	0,979
η, о.е.	0,87	0,87	0,858	0,847	0,831	0,784	0,776	0,636
cosφ, о.е.	0,868	0,868	0,861	0,926	0,853	0,937	0,837	0,934

$$P_{нас.агрi.}=\rho\cdot g\cdot H_i\cdot Q_i/(1000\cdot\eta_{насi.}\cdot\eta_{двi}\cdot\eta_{пч}). \qquad (9)$$

Энергия, потребляемая насосным агрегатом за сутки при использовании регулируемого электропривода, рассчитывается по участкам, рис. 1:

$$\Sigma W=\Sigma tP_{нас.агрi.}. \qquad (10)$$

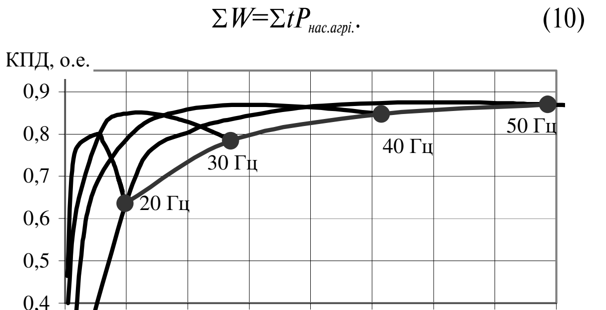


Рис. 3. *Зависимости $\eta_{дв}=f(P_2)$ АД при законе U/f^2=const*

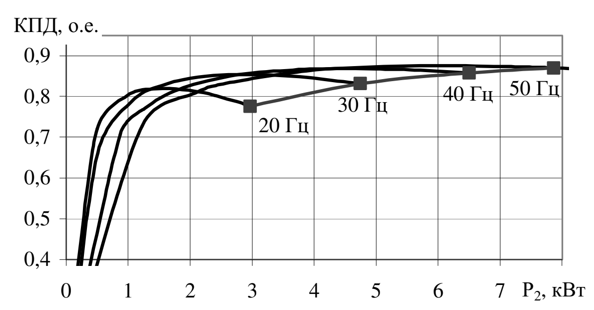


Рис. 4. *Зависимости $\eta_{дв}=f(P_2)$ АД при законе U/f=const*

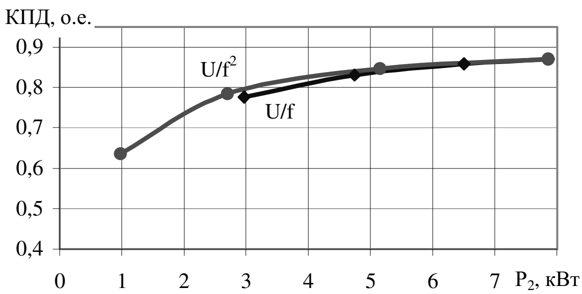


Рис. 5. *Зависимости $\eta_{дв}=f(P_2)$ АД при законах U/f=const и U/f^2=const*

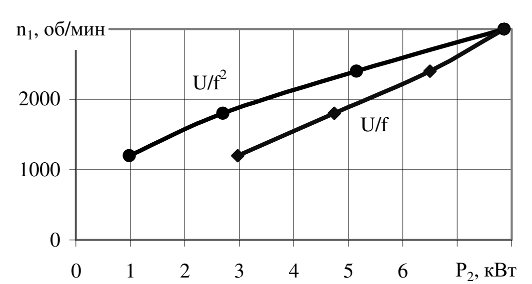


Рис. 6. *Зависимости $n=f(P_2)$ АД при законах U/f=const и U/f^2=const*

Для нерегулируемого электропривода получаем по формуле (9) мощность, потребляемую насосным агрегатом, не учитывая при этом КПД преобразователя частоты, что составит 6,24 кВт. Энергию, потребляемую за сутки, рассчитываем по формуле (10) в соответствии с графиком суточного водопотребления (рис. 2), при этом энергия, использованная без регулирования частоты вращения насоса составит 150 кВт·ч.

Результаты расчетов для регулируемого электропривода при законе U/f^2=const сведены в табл. 2.

Аналогичным образом рассчитывается потребляемая электроэнергия за сутки для закона U/f=const, которая составит 79,78 кВт·ч.

Экономия электроэнергии, полученная при замене нерегулируемого электропривода на регулируемый, рассчитывается по формуле (1). При заданной мощности насосного агрегата и характеристиках трубопровода экономия электроэнергии составит: при законе U/f^2=const 69,67 кВт·ч – за сутки, или 47,0 %; при законе U/f=const 70,22 кВт·ч – за сутки, или 46,8 %. Результаты расчетов показали, что экономия электроэнергии, полученная при замене нерегулируемого электропривода на регулируемый, составляет свыше 40 % для обоих законов. Эта оценка проведена только с учетом влияния КПД на энергосбережение насосного агрегата. При частотном регулировании увеличивается дополнительно коэффициент мощности, учет влия-

Таблица 2. *Расчет потребляемой электроэнергии при регулировании частоты вращения насосного агрегата в течение суток*

$Q_i/Q_н$, о.е.	Q_i, м^3/ч	H_i, м	n_i, об/мин	$\eta_{нас\,i}$, о.е.	$P_{дв\,i}$, кВт	$\eta_{дв\,i}$, о.е.	$P_{нас,\,агр.i}$, кВт	t_i, ч	W_i, кВт ч
0,10	4,50	15,65	1911,54	0,18	3,05	0,800	1,360	5	6,8
0,15	6,75	15,84	1929,11	0,21	3,10	0,807	1,755	1	1,755
0,20	9,00	16,12	1953,45	0,27	3,17	0,814	1,836	1	1,836
0,30	13,50	16,89	2021,38	0,35	3,34	0,820	2,210	2,5	5,525
0,50	22,50	19,37	2224,86	0,50	3,35	0,815	2,975	1	2,975
0,60	27,00	21,08	2354,57	0,55	4,70	0,840	3,426	1	3,426
0,65	29,25	22,04	2425,18	0,60	5,09	0,855	3,496	1	3,496
0,70	31,50	23,09	2499,20	0,61	5,50	0,860	3,856	4,5	17,352
0,80	36,00	25,42	2656,31	0,67	6,00	0,863	4,401	3	13,203
0,90	40,50	28,05	2823,82	0,68	7,15	0,867	5,359	1,5	8,039
1,00	45,00	31,00	3000,00	0,70	7,86	0,870	6,369	2,5	15,922
								Итого:	80,329

ния которого будет произведен в последующих работах. Кроме этого обеспечивается экономия воды до 20 % и повышение надежности работы сетей [7].

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Предложена методика расчета энергосбережения насосного агрегата при частотном регулировании, в которой учтены характеристики насоса, трубопровода и энергетические характеристики асинхронного двигателя.
2. Применение регулируемого электропривода при обоих рассмотренных законах управления обеспечивает экономию электроэнергии свыше 40 %. Однако, наиболее приемлемым для вентиляторной нагрузки является закон U/f^2=const. Он обеспечивает меньшую потребляемую мощность при той же величине частоты в диапазоне регулировании вниз от номинального значения и имеет КПД выше, чем при использовании закона с линейной зависимостью.

Работа выполнена по гранту Минобразования России PD02-2.6-199.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Санкт-Петербургская Электротехническая Компания. Эффективность использования современных частотно-регулируемых электроприводов. — СПб., 2001. — С. 15. Режим доступа: http://www.spbec.ru 12.03.2003.
2. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках. — М: ИК Ягорба Биоинформсервис, 1998. — 180 с.
3. Центробежные консольные насосы общего назначения для воды. Каталог. — М., 1989.
4. Загорский А.Е. Регулируемые электрические машины переменного тока. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 288 с.
5. Муравлев О.П., Муравлева О.О. Перспективы разработки и применения асинхронных двигателей для энергосберегающих технологий // Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития: Труды IV Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу. — 14—17 сент. 2004 г., Магнитогорск, 2004. — С. 193—195.
6. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Копылова. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 2002. — 757 с.
7. Андронов А.Л. Энергосбережение в системах водоснабжения средствами частотного регулирования электропривода // Электроэнергия и будущее цивилизации: Матер. Междунар. научн.-техн. конф. — 19—21 мая 2004 г., Томск, 2004. — С. 251—253.